

# Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi w napędzie pojazdu hybrydowego

Andrzej Białas, Emil Król

## 1. Wstęp

Napęd hybrydowy jest połączeniem dwóch rodzajów napędów, najczęściej silnika spalinowego z silnikiem elektrycznym. Silnik spalinowy połączony jest – poprzez różnego typu przekładnie lub bezpośrednio – z silnikiem elektrycznym, który pełni również rolę prądnicy (generatora), służącej do ładowania akumulatorów. W zależności od konfiguracji oraz potrzeb napędu silniki spalinowy i elektryczny mogą pracować razem (równoległe) podczas dużego zapotrzebowania na moment obrotowy (np. przyspieszanie lub jazda z dużym obciążeniem) lub oddzielnie – tylko silnik spalinowy lub tylko elektryczny. W zależności od konfiguracji elementów napędzających wyróżnia się układy hybrydowe szeregowy, równoległy i mieszane.

W układzie szeregowym energia mechaniczna wytwarzana przez silnik spalinowy jest w całości przetworzona na energię elektryczną gromadzoną w akumulatorach oraz do napędu silnika elektrycznego. W przypadku dużego zapotrzebowania na moc silnik elektryczny może korzystać z energii zgromadzonej w akumulatorach. W układach tych zwykle nie stosuje się skrzyni biegów. W układzie równoległym część energii mechanicznej wytworzonej przez silnik spalinowy napędza pojazd, a pozostała część ładuje akumulatory. Gdy potrzebna jest duża moc, silniki mogą pracować równoległe (razem) jako źródło napędu. Podczas hamowania silnik elektryczny hamuje odzyskowo, zwracając energię do akumulatora. Układ mieszany jest kombinacją cech układów równoległego i szeregowego. Do wad napędu hybrydowego należy zaliczyć większą masę pojazdu oraz większą cenę, natomiast do zalet konstrukcji napędów hybrydowych należy zaliczyć redukcję emisji spalin samochodowych oraz ograniczeniu hałasu, co skutkuje w oczywisty sposób poprawą jakości życia szczególnie w aglomeracjach miejskich.



Rys. 1. Pojazd poddany elektryfikacji

**Streszczenie:** W artykule omówiono sposób doboru oraz miejsce montażu silnika synchronicznego do napędu pojazdu dostawczego hybrydowego bimodalnego. W pojeździe tym silnik elektryczny został zamontowany na wale Cardana. Zaprojektowano i wykonano specjalny silnik, który będzie pracował w dwóch trybach: jako napęd i jako generator ładujący akumulatory pokładowe. Zastosowany napęd cechuje się wysokim momentem oraz możliwością pracy w bardzo szerokim zakresie prędkości obrotowych.

Słowa kluczowe: pojazd elektryczny, napęd elektryczny, silnik synchroniczny, bateria trakcyjna

## PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR IN HYBRID VEHICLE DRIVE

**Abstract:** In the paper the concept of conversion a vehicle for bimodal hybrid car was described. A special synchronous permanent magnets motor attended to the hybrid vehicle was designed. New motor will be mounted directly on the Cardan shaft. The special motor which will operate in two modes, as the drive and as a generator charging the on board battery was designed and made. The used drive has a high torque and ability to operate in a very wide speed range.

Keywords: electric vehicle, electric drive, synchronous motor, traction battery

## 2. Pojazd demonstracyjny

Pojazd demonstracyjny powstał na bazie samochodu osobowo-towarowego DZT Pasagon produkcji polskiej (rys. 1).

Podstawowe parametry samochodu:

- dopuszczalna masa całkowita: 3490 kg;
- ładowność: 1340 kg;
- nadwozie: 2-drzwiowe;
- ilość miejsc: kierowca + 2;
- zbiornik paliwa: 80 dm<sup>3</sup>;
- silnik wysokoprężny Andoria:
  - pojemność skokowa: 2,636 dm<sup>3</sup>
  - moc max: 85 kW,
  - max moment obrotowy: 250 N·m przy 2000 obr/min;
- układ napędowy:
  - skrzynia biegów manualna, pięciobiegowa,
  - napęd na koła tylne.

### 3. Parametry napędu elektrycznego

Dobór oraz zaprojektowanie elektrycznego silnika napędowego wymagały pogodzenia kilku sprzecznych parametrów napędu. Silnik z jednej strony powinien dysponować odpowiednio dużym momentem i mocą do komfortowej jazdy oraz przyspieszania, z drugiej strony moc tę należy ograniczyć ze względu na masę silnika elektrycznego oraz masę i parametry (głównie pojemność) elektrycznej akumulatora. Ponadto wał silnika elektrycznego musi przenieść pełny moment silnika spalinowego, co spowodowało konieczność zwiększenia średnicy wału oraz masy silnika.

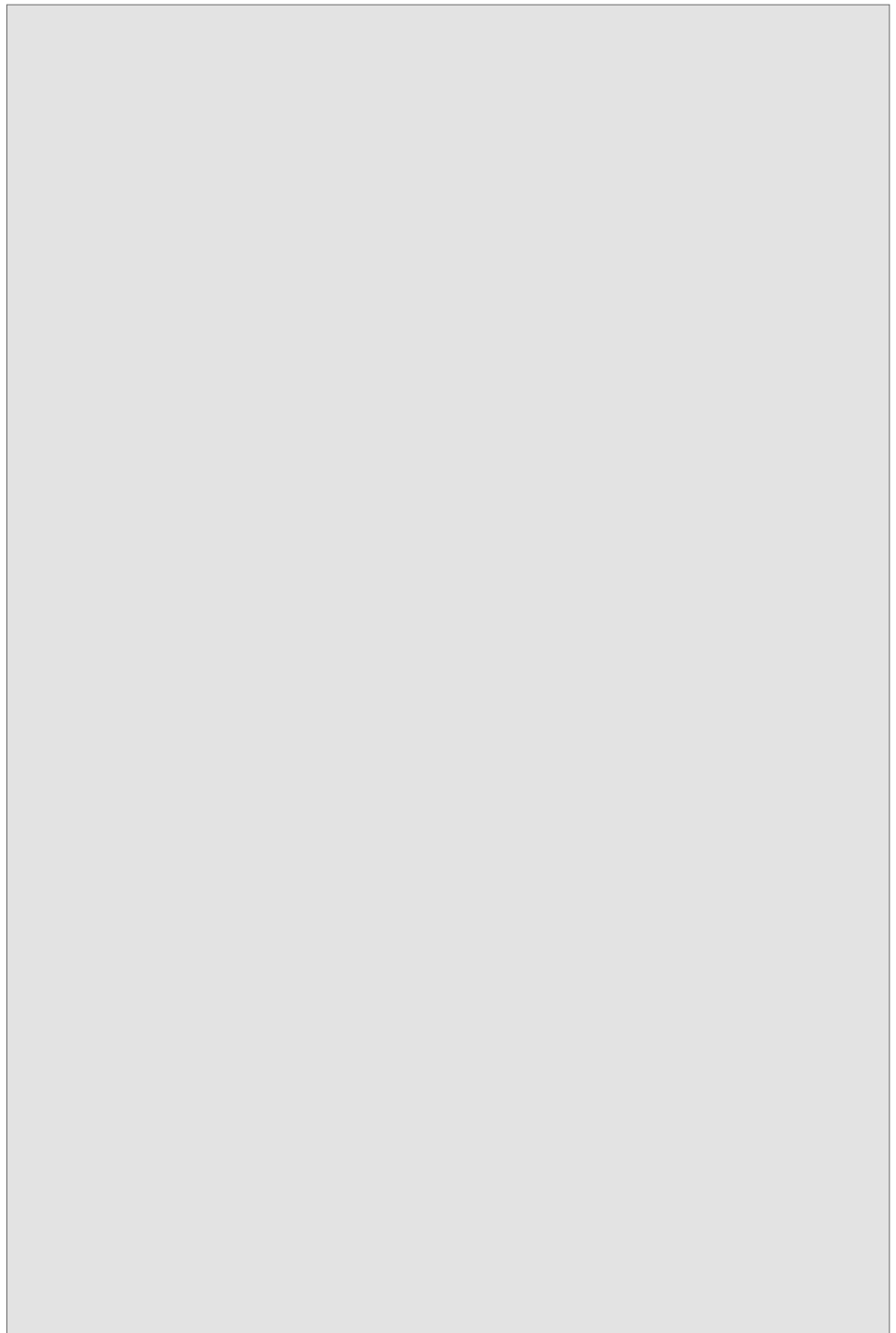
Ze względu na masę napędu i wymagany duży moment zdecydowano się na zastosowanie silnika synchronicznego z magnesami trwałymi z wirnikiem typu IPM (*Interior Permanent Magnet*). Silnik taki został zaprojektowany i wykonany w Instytucie Komel. Silniki z magnesami trwałymi są coraz częściej stosowane w napędach trakcyjnych [2]. Posiadają szereg zalet, które pozwalają im być najlepszym napędem trakcyjnym. Do podstawowych zalet silników z magnesami trwałymi możemy zaliczyć:

- wysoki stosunek uzyskiwanego momentu lub mocy do objętości lub masy maszyny;
- dużą przeciążalność momentem;
- pracę w szerokim zakresie prędkości obrotowych;
- wysoką sprawność.

Silnik w opisywanym napędzie będzie pracował w dwóch strefach regulacji (ze stałym momentem i stałą mocą – rys. 2). Silnik będzie spełniał specyficzne wymagania dla tego typu napędu. Szczególnie ważna jest praca generatorowa przy bardzo wysokich prędkościach obrotowych. Zakłada się, że prędkość maksymalna pojazdu z wykorzystaniem tylko silnika elektrycznego nie przekroczy 70 km/h, natomiast prędkość maksymalna pojazdu z silnikiem spalinowym wynosi ponad 140 km/h. W związku z tym praca generatorowa będzie odbywać się w bardzo niekorzystnych warunkach dla falownika oraz akumulatora (wysokie napięcia na zaciskach prądnicy i konieczność utrzymania kontrolowanego prądu ładowania akumulatora). Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi z wirnikiem IPM dysponuje dwoma składowymi momentami elektromagne-

tycznego. Oprócz występującej we wszystkich konstrukcjach silników PMSM składowej związanej z siłą magnetomotoryczną magnesów trwałych, w silnikach z wirnikiem IPM występuje jeszcze składowa reluktancyjna momentu synchronicznego. Składowa reluktancyjna związana jest z asymetrią magnetyczną wirnika. Cechą charakterystyczną asymetrii magnetycznej wirników w silnikach PMSM jest to, że reluktancja magnetyczna w osi  $d$  wirnika jest zwykle znacząco większa od reluktancji w osi  $q$  [3]. Im większą wartością ilorazu  $X_q/X_d$  charakteryzuje się zastosowana konstrukcja wirnika w danym silniku, tym większa jest wartość składowej reluktancyjnej momentu synchronicznego i tym samym jej udział w wypadkowym momencie synchronicznym  $T_e$  silnika może być większy. Zależnie od

reklama



konstrukcji wirnika, składowa reluktancyjna ma zwykle od 5% do 30% udziału w wypadkowym momencie synchronicznym wytwarzanym przez silnik PMSM.

W silniku synchronicznym z wirnikiem IPM przy zastosowaniu odpowiedniego sterowania wykorzystuje się moment reluktancyjny. Sterowanie falownikiem musi utrzymać stosunek prądu w osi  $d$  i  $q$  taki, aby moment elektromagnetyczny silnika, w każdym punkcie pracy, był maksymalny. Zależność na moment elektromagnetyczny  $T_e$  3-fazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM) zasilanego sinusoidalną falą prądu przyjmuje postać:

$$T_e = \frac{3 \cdot p}{2} [\Psi_d I_q - \Psi_q I_d] \quad (1)$$

a po uwzględnieniu że  $\Psi_d = L_d I_d + \Psi_{mag}$  oraz  $\Psi_q = L_q I_q$  otrzymujemy:

$$T_e = \frac{3 \cdot p}{2} [I_q \Psi_{mag} + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (2)$$

gdzie:

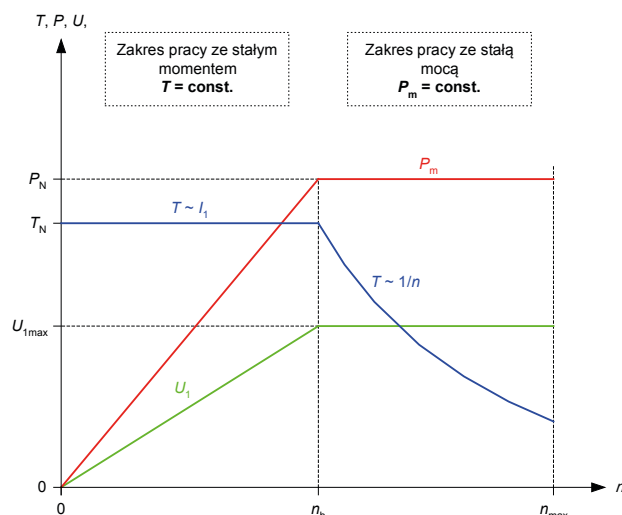
- $\Psi_d$  – strumień skojarzony z uzwojeniem stojana w osi  $d$ ;
- $\Psi_q$  – strumień skojarzony z uzwojeniem stojana w osi  $q$ ;
- $\Psi_{mag}$  – strumień wzbudzenia od magnesów trwałych skojarzony z uzwojeniem stojana;
- $L_d, L_q$  – indukcyjności odpowiednio w osi  $d$  i  $q$ ;
- $p$  – liczba par biegunów;
- $I_d, I_q$  – składowe prądów uzwojenia stojana w osi  $d$  i  $q$ .

Wzór (2) stosuje się przy obliczaniu momentu elektromagnetycznego silników z wirnikiem, który posiada różne reaktancje w osiach  $d$  i  $q$ .

Parametry zaprojektowanego i wykonanego elektrycznego silnika napędowego:

- moc znamionowa – 45 kW;
- moc maksymalna – 75 kW;
- prędkość znamionowa – 1800 obr/min;
- moment maksymalny 400 N·m;
- prędkość maksymalna przy pracy prądnicowej 5000 obr/min.

Nowoczesne napędy elektryczne, stosowane w elektrycznych pojazdach drogowych, muszą charakteryzować się szerokim zakresem regulacji prędkości obrotowej, zwykle w zakresie od zera do kilku tysięcy obrotów na minutę. Opracowano kilka strategii sterowania [5] napędami elektrycznymi z silnikami PMSM o szeroko regulowanej prędkości obrotowej. W wyniku zastosowania tych strategii oraz dzięki odpowiedniej konstrukcji wirników w silnikach PMSM [4, 5] uzyskiwane są typowe charakterystyki elektromechaniczne napędu o szeroko regulowanej prędkości, pokazane na rys. 2. Na charakterystykach tych wyróżnić można dwie strefy regulacji prędkości, tzw. strefę stałego momentu i strefę stałej mocy. W pierwszej strefie regulacji prędkości obrotowej, od zera aż do tzw. prędkości bazowej  $n_b$ , silniki PMSM są sterowane wg takiego algorytmu, by pracowały



Rys. 2. Charakterystyki silnika z dwustrefową regulacją prędkości obrotowej

przy optimum ilorazu osiąganego momentu elektromagnetycznego do prądu zasilania  $T/I_1$ . W drugiej strefie regulacji prędkości  $P = \text{const.}$  Powyżej prędkości bazowej  $n_b$  silnik pracuje w drugiej strefie regulacji prędkości, w której wzrost napięcia na zaciskach silnika  $U_1$  nie jest już możliwy. Dalsze zwiększanie prędkości obrotowej wirnika osiąganego jest dzięki zastosowaniu techniki osłabiania strumienia magnetycznego głównego w szczeliny powietrznej silnika. Osłabianie strumienia w silnikach PMSM uzyskuje się poprzez wytworzenie odpowiedniej ujemnej podłużnej reakcji twornika, skutkującej nieprzekroczeniem limitu napięcia  $U_{1max}$ .

Dwustrefowa metoda regulacji prędkości obrotowej napędu elektrycznego wymaga zastosowania złożonych algorytmów sterowania napędem o dużym nakładzie obliczeniowym. Dla potrzeb napędu pojazdu hybrydowego konieczne jest zastosowanie przekształtnika energoelektronicznego wyposażonego w wydajny procesor sygnałowy. Aby zapewnić możliwie wysoką niezawodność całego napędu, przekształtnik powinien być także wyposażony w różnego typu zabezpieczenia sprzętowe (np. nadnapięciowe, podnapięciowe, nadprądowe, temperaturowe itp.) ograniczające możliwość jego zniszczenia podczas codziennej eksploatacji w pojeździe hybrydowym.

## 4. Konstrukcja mechaniczna napędu hybrydowego bimodalnego

W omawianym pojeździe dostawczym zastosowano napęd hybrydowy bimodalny. W tym typie napędu silnik elektryczny (rys. 3) nigdy nie pracuje jako napęd równocześnie z silnikiem spalinowym, może natomiast pracować jako prądnica do ładowania akumulatorów lub układ odzyskujący energię podczas hamowania. W pojeździe można wyróżnić trzy tryby pracy: z wykorzystaniem tylko napędu spalinowego, z wykorzystaniem tylko napędu elektrycznego oraz tryb awaryjny, w którym używany jest silnik spalinowy, a silnik elektryczny pracuje jako prądnica ładująca akumulatory pokładowe. Tryb ten traktowany jest jako awaryjny, ponieważ ekonomicznie znacznie korzystniej jest naładować akumulatory z sieci elektrycznej



Rys. 3. Silnik napędowy ze sprzęgłami Cardana

niż używać silnika spalinowego do ładowania akumulatorów pokładowych.

Napędowy silnik elektryczny został zamontowany w układzie bezprzekładniowym, bezpośrednio na wale napędowym pojazdu, który przenosi moment obrotowy pomiędzy skrzynią biegów a tylnym mostem z mechanizmem różnicowym (rys. 4). Prędkość obrotowa wirnika w silniku elektrycznym będzie zawsze taka sama, jak prędkość obrotowa wału napędowego pojazdu. Wał silnika elektrycznego został zaprojektowany tak, aby umożliwić przeniesienie napędu silnika spalinowego i przekładni zmiany biegów. Moment, który wał silnika musi przenieść, wynosi ponad 1100 N·m przy pełnym momencie silnika spalinowego i użytym 1 biegu skrzyni przekładniowej. Silnik elektryczny jest zaprojektowany tak, by w trybie elek-

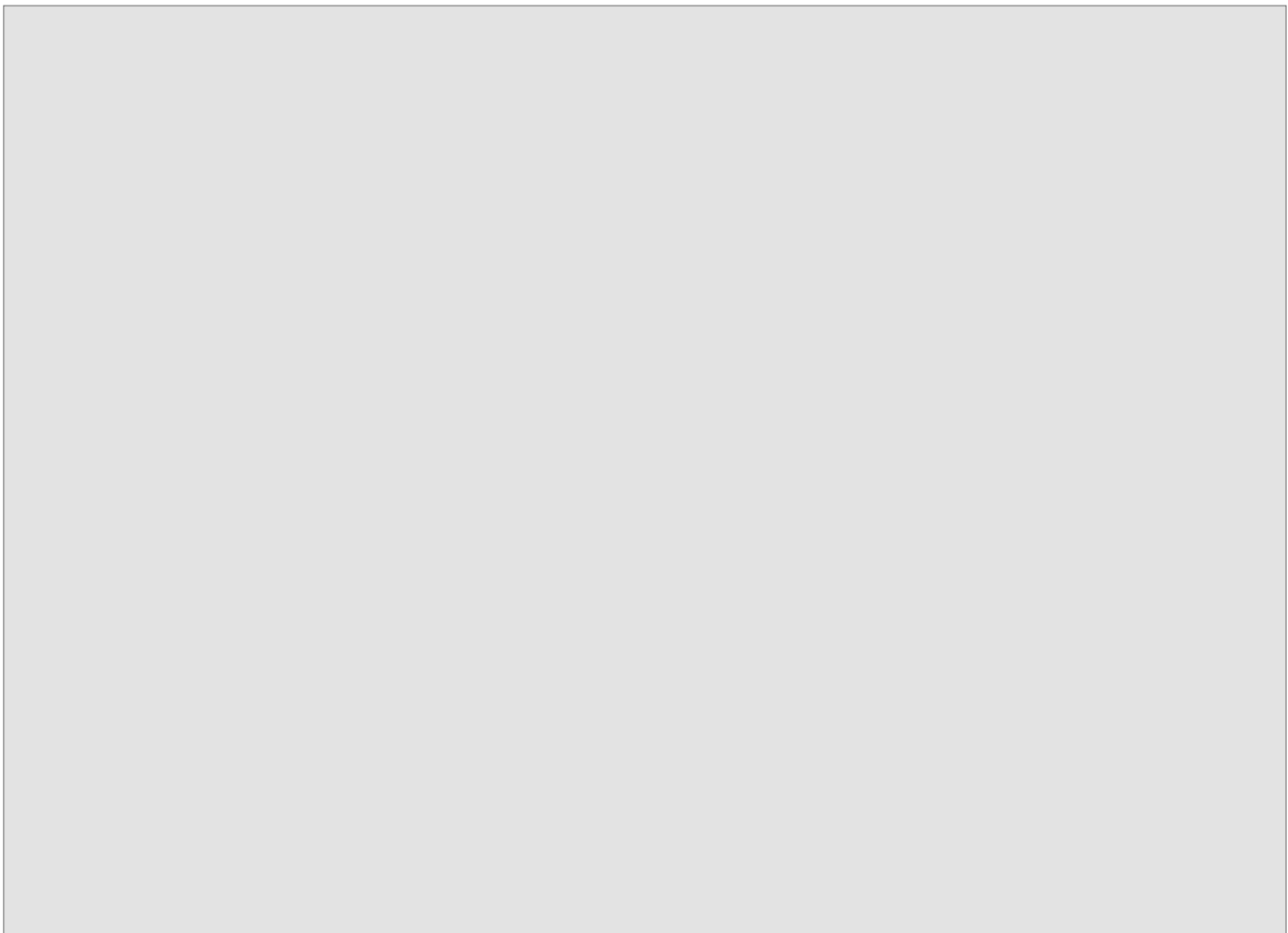
trycznym napędu hybrydowego najwyższą sprawność osiągał w możliwie szerokim zakresie prędkości pojazdu z przedziału od 0 do ok. 50 km/h.

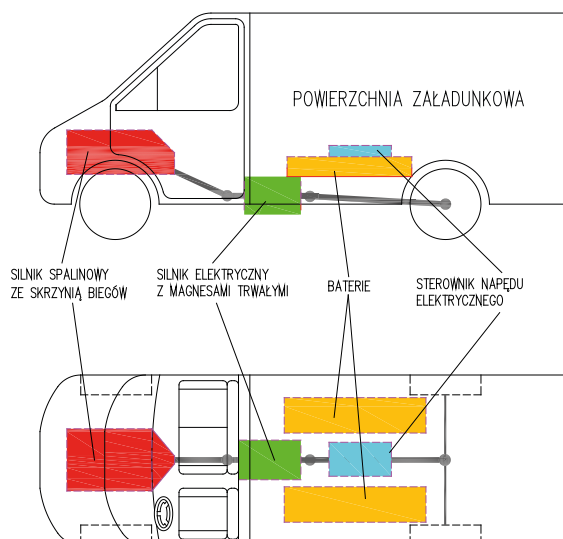
Ładowanie akumulatora (akumulatorów) pokładowego jest możliwe w dwóch stanach. Podczas jazdy pojazdu w trybie diesel silnik elektryczny pracuje w trybie pracy generatorowej ładowania lub doładowywania baterii. W takim stanie pracy sam silnik i pozostałe podzespoły elektrycznego układu napędowego są tak dopasowane elektrycznie, aby generowane napięcie na zaciskach silnika (generatora) elektrycznego podczas jazdy z większymi prędkościami, aż do prędkości maksymalnej włącznie, nigdy nie przekraczały wartości dopuszczalnych (bezpiecznych) i nie spowodowały uszkodzenia któregoś z tych podzespołów (przekształtnik, bateria akumulatorów itp.). Na rys. 5 pokazano schemat połączeń akumulatorów trakcyjnych wraz z niezbędnymi elementami, które zabezpieczają elementy napędu przed niekontrolowanymi prądami podczas zamykania obwodów prądowych.

## 5. Podsumowanie

Zastosowanie w pojeździe napędu hybrydowego bimodalnego pozwoli w znacznym stopniu ograniczyć koszty eksploatacji pojazdu oraz zmniejszyć oddziaływanie na środowisko naturalne. Wadą jednak jest początkowy koszt związany z zakupem pojazdu z takim napędem oraz zmniejszenie jego ładowności.

reklama



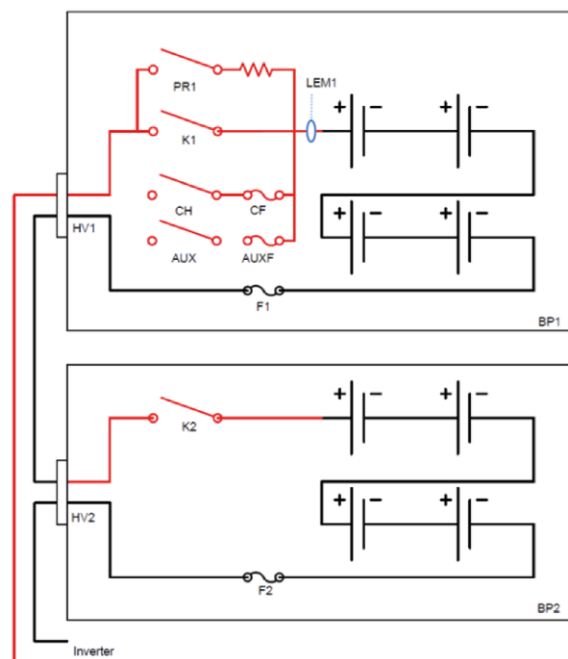


Rys. 4. Rozmieszczenie elementów napędu hybrydowego bimodalnego spalinowo-elektrycznego

Zwiększenie kosztów związane jest głównie z potrzebą zastosowania odpowiednich baterii oraz przekształtnika energoelektronicznego. Aby w pełni wykorzystać możliwości silnika z magnesami trwałymi, powinien on być zasilany z dedykowanego do niego przekształtnika energoelektronicznego. Obecnie przekształtniki te nie są tak rozpowszechnione i uniwersalne, jak przekształtniki dla silników asynchronicznych, z tej przyczyny cena przekształtników do silników z magnesami trwałymi utrzymuje się na wyższym poziomie.

### Literatura

- [1] DĄBROWSKI Z.: *Wały napędowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [2] GLINKA T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [3] BERNATT J.: *Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzonych magnesami trwałymi*. Wydawnictwo BOBRME Komel, Katowice 2011.
- [4] KRÓL E., ROSSA R.: *Silniki z magnesami trwałymi o dużej przeciążalności momentem*. Zeszyty problemowe „Maszyny Elektryczne” 81/2009, BOBRME Komel.



Rys. 5. Schemat połączenia akumulatorów trakcyjnych w pojeździe

- [5] ROSSA R., KRÓL E.: *Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 81/2009, BOBRME Komel, s. 125–129.
- [6] FRĘCHOWICZ A., DUKAŁSKI P., BIAŁAS A.: *Projekt napędu samochodu elektrycznego z dwustrefowym układem sterowania współpracującym z silnikiem PMSBLDC*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 3/2012 (96), BOBRME Komel, s. 115–121.

Praca finansowana ze środków NCBiR w ramach projektu rozwojowego nr NR01-0085-10/2010.

Andrzej Białas, Emil Król  
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych „Komel”, Katowice

artykuł recenzowany